

Отзыв

официального оппонента на диссертацию И.С.Черноштанова «Альфвеновская ионно-циклотронная неустойчивость в открытых ловушках с инжекцией пучков быстрых атомов», представленную на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук по специальности 01-04-08 – Физика плазмы

В открытых ловушках распределение ионов по скоростям анизотропно, что согласно теории может приводить к развитию ряда т.н. кинетических неустойчивостей. К их числу принадлежит альфвеновская ионно-циклотронная (АИЦ) неустойчивость, надежно идентифицированная в ряде экспериментов. Развитие неустойчивостей, обязанных анизотропии функции распределения ионов по скоростям, сопровождается уменьшением анизотропии, что должно приводить к уходу частиц из открытых магнитных ловушек. По этой причине теоретическое исследование данной неустойчивости с определением условий ее возникновения представляет несомненный интерес. В диссертации рассмотрен вопрос о линейной стадии и нелинейном насыщении АИЦ неустойчивости в открытых ловушках с инжекцией мощных атомарных пучков. Результаты диссертации важны для интерпретации экспериментов на открытых ловушках, в частности, на установке ГДЛ в ИЯФ СО РАН. По этим причинам *актуальность тематики диссертации не вызывает сомнений.*

В диссертации впервые исследована АИЦ неустойчивость в би-максвелловской плазме с большой анизотропией и сильной пространственной неоднородностью. Найден новый скейлинг границы устойчивости, справедливый для сильно анизотропной ограниченной плазмы. Разработан метод анализа границы АИЦ неустойчивости в открытой ловушке с большим отношением продольного размера неоднородности к радиусу плазмы, и с использованием функций распределения ионов, близких к тем, что реализуются в эксперименте. Предложена новая модель нелинейного насыщения АИЦ неустойчивости, основанная на точных нелинейных решениях уравнений Власова-Максвелла. *Научная новизна представленных в диссертации результатов подтверждается их публикацией в научных журналах и докладами на конференциях.*

Представленные в диссертации модели основаны на системе уравнений Максвелла и кинетических уравнениях Власова и Фоккера-Планка. Уравнения Максвелла и бесстолкновительное уравнение Власова используются в подавляющем большинстве работ, посвященных

исследованию кинетических неустойчивостей, и их применение в рассматриваемой диссертации выглядит *обоснованным*. Ряд приведенных в диссертации результатов сравнивается с экспериментальными данными и результатами других авторов. Все это позволяет считать полученные в диссертации результаты *достоверными*.

В 1 главе рассматривается модельный случай бимаксвелловского распределения ионов по скоростям. В этом случае удается провести последовательный анализ АИЦ неустойчивости с учетом основных факторов, определяющих ее развитие. Циклотронные неустойчивости вызываются циклотронным резонансным взаимодействием плазменных колебаний с заряженными частицами. Неоднородность магнитного поля, характерная для магнитных ловушек, разрушает резонанс, поэтому ее учет должен быть непременно элементом теоретического анализа. Движение ионов вдоль неоднородного магнитного поля приводит к тому, что отклик плазмы на переменное электрическое поле становится нелокальным и, следовательно, волновое уравнение – интегральным. Общая методика вывода интегральных уравнений отсутствует, так как вид конкретного волнового уравнения определяется процессами, которые оно описывает. В 1 главе диссертации, см. также Приложение 1, развита оригинальная процедура получения волнового уравнения, пригодного для описания АИЦ неустойчивости в открытых ловушках с большой анизотропией ионной функции распределения. В Приложении 2 описан алгоритм численного решения данного уравнения.

С увеличением анизотропии функции распределения ионов по скоростям плазма стягивается к минимуму магнитного поля открытой ловушки. При этом эффекты, обусловленные движением ионов вдоль магнитного поля, становятся несущественными, и нелокальное интегральное волновое уравнение трансформируется в дифференциальное второго порядка для лево поляризованной составляющей электрического поля рассматриваемых колебаний. Данное уравнение не связано с уравнением для право поляризованного поля, что является еще одним существенным упрощением при большой анизотропии. Проанализированы решения с действительными значениями частоты, которые могут существовать в плазме, находящейся на границе области устойчивости. Найдено, что с ростом давления плазмы первыми становятся неустойчивыми наиболее крупномасштабные колебания – т.н. нулевая мода. Влияние холодной плазмы на неустойчивость оказывается двояким. Стабилизирующий эффект обусловлен появлением волн, уносящих энергию из области слабого магнитного поля, где сконцентрированы горячие ионы. С другой стороны, в

присутствии холодной плазмы неустойчивые колебания стягиваются к центру ловушки, что облегчает резонансную накачку колебаний ионами. Результаты, полученные в 1 главе, суммированы рис. 7, на котором показана граница области неустойчивости на плоскости анизотропия – давление плазмы. Отмечается соответствие результатов, полученных решением интегрального уравнения и с помощью ВКБ-приближения.

Распределения ионов по скоростям в реальных ловушках отличаются от бимаксвелловских. В центральную ячейку ловушки ГДЛ ионы вводятся посредством инъекции быстрых нейтралов. В этом случае функция распределения ионов формируется под действием кулоновских столкновений. Столкновения с электронами вызывают замедление ионов, а столкновения с ионами приводят к уширению распределения по питч-углу. Эти факторы учтены в кинетическом уравнении, решение которого определяет вид функции распределения. Во 2 главе найденное решение аппроксимируется рядом, слагаемые которого включают известные функции. Это обстоятельство существенно облегчает анализ колебаний, который проводится в квазиклассическом приближении. Так как поперечный размер плазмы мал по сравнению с продольным, то в диссертации используется адиабатическое приближение. В нем поперечная структура колебаний определяется при фиксированных продольной координате и продольном волновом числе, а число волн, укладывающихся в поперечном направлении, является адиабатическим инвариантом, не меняющимся с продольной координатой.

Анализ движения ионов на фазовой плоскости под действием колебания показывает, что неустойчивыми могут быть лишь такие, условие циклотронного резонанса которых с учетом эффекта Доплера, выполняется для частиц, не замедлившихся в результате взаимодействия с холодной плазмой. Неоднородность системы приводит к тому, что резонансные колебания «завязываются» с альфвеновскими колебаниями холодной плазмы.

Во 2 главе исследована зависимость критического давления плазмы и частоты колебаний на пороге неустойчивости от ряда параметров, характеризующих неравновесную плазму в открытых ловушках (радиус плазмы, температура электронов, плотность холодной плазмы, угол инъекции быстрых нейтралов, продольный масштаб магнитного поля). Сделан вывод о том, что вектора электрического поля в центре плазменного шнура и на его периферии могут вращаться навстречу друг другу, что

действительно наблюдалось в экспериментах, проводившимся на ряде установок.

В 3 главе рассматривается возможность стабилизации неустойчивости в результате установления нелинейной монохроматической волны. Рассматривается простейшая волна с винтовой (спиральной) симметрией, гармонически зависящая от времени и продольной координаты. Движение ионов в такой волне описывается с помощью гамильтонова формализма. Показано, что соответствующий гамильтониан может быть приведен к виду второго фундаментального гамильтониана. После подстановки токов частиц в уравнения Максвелла получены соотношения, определяющие зависимость частоты волны и ее амплитуды от параметров плазмы, в частности, от функции распределения ионов по скоростям. При ее нахождении в 3 главе, в отличие от второй, учитывается влияние альфвеновской волны, но игнорируется рассеяние по питч-углу, вызванное ион-ионными столкновениями (см. также Приложение 3). При инъекции поперек магнитного поля с использованием решения кинетического уравнения получены сравнительно простые аналитические соотношения, связывающие мощность инъекции с амплитудой стационарной волны и ее частотой (см. также Приложение 4). Случай инъекции с разбросом по питч-углу исследован численно. Найдено, в частности, что с увеличением разброса частота стационарной волны удаляется от ионной циклотронной, а мощность инъекции, при которой достигается насыщение неустойчивости, возрастает.

Замечания: 1. В 1 главе утверждается, что электрическое поле неустойчивых колебаний на достаточно большом расстоянии от центра ловушки не зависит от координаты вплоть до ее бесконечных значений, см. стр.22. Следовало бы оценить предельное расстояние, до которого оно на самом деле справедливо. 2. Согласно двум первым главам в присутствии холодной плазмы неустойчивые колебания с удалением от центра ловушки принимают вид волн, убегających к пробкам. Необходимо указать механизм, обеспечивающий их поглощение. 3. В 3 главе утверждается, что пространственно-временные зависимости электрических токов и возбуждающей их волны совпадают. Ввиду нелинейности рассматриваемых уравнений это положение требует подробного обсуждения. 4. В тексте диссертации можно найти ряд огрехов. В частности, в комментарии к уравнению (21) вместо условия $A \gg 1$, при котором оно справедливо, приведено $A \rightarrow \infty$. На стр. 27 неверно указан номер формулы, определяющей условие устойчивости. На стр. 46 единственное выражение,

удовлетворяющее условию спиральной симметрии (циркулярно поляризованные колебания), названо общим.

Суммируя содержание отзыва, укажем, что диссертация И.С. Черноштанова является научно-квалификационной работой, в которой разработаны методы анализа границы АИЦ неустойчивости в открытых ловушках с инъекцией атомарных пучков и расчета параметров, при которых происходит ее нелинейное насыщение. Таким образом, в соответствии с п. 9 Положения, решена научная задача, важная для развития открытых ловушек. Недостатки диссертации, указанные в отзыве, не затрагивают ее основного содержания.

Диссертация удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям согласно Положению о порядке присуждения ученых степеней (утвержденному Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842 “О порядке присуждения ученых степеней”). Содержание диссертации верно отражено в автореферате. Ее автор И.С. Черноштанов *заслуживает* присуждения ученой степени кандидата физ.-мат. наук по специальности 01-04-08 – Физика плазмы.

Доктор физико-математических наук,

профессор

А.В.Тимофеев

Главный научный сотрудник Курчатовского комплекса физико-химических технологий Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,

123182, Москва, пл. Курчатова. Д.1, НИЦ “Курчатовский институт”, тел. 84991969905, e-mail: Timofeev_AV@nrcki.ru

« » мая 2015г.

Подпись А.В.Тимофеева заверяю

Первый заместитель директора Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»


 М.А.Камболов